

非线性放大环形镜被动锁模光纤激光器 重复频率精确锁定研究

杨松^{1**}, 郝强^{1*}, 曾和平^{1,2}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

²华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 采用共振增强式非线性折射率调制技术实现了非线性放大环形镜锁模掺镱全保偏光纤激光器重复频率的精确锁定。通过在激光器非线性环内加入一个能提供线性相移的非互易性元件,有效减小了锁模脉冲的抽运阈值。进一步优化激光器的锁模抽运功率和控制光纤非线性折射率的抽运功率,可使激光器直接输出的最短脉冲为 590 fs,重复频率为 20.48 MHz,重复频率峰-峰值的波动范围小于 0.4 mHz,相应的标准偏差为 0.1 mHz。

关键词 激光器; 光纤激光器; 非线性放大环形镜; 非线性折射率; 重复频率锁定; 超快激光

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0801007

Repetition Rate Precision Lock of Nonlinear Amplifying Loop Mirror Passively Mode-Locked Fiber Laser

Yang Song^{1**}, Hao Qiang^{1*}, Zeng Heping^{1,2}

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract High precision repetition rate stabilization is realized in an all polarization-maintaining nonlinear amplifying loop mirror (NALM) mode-locked Yb-fiber laser. An additional Er-fiber is added in the nonlinear loop to control the optical length by the resonance-enhanced nonlinearity modulation technique. Moreover, an integrated nonreciprocal device with linear phase shift effectively reduces the mode-locking threshold. By optimizing both the pump power from two laser diodes for mode locking and the nonlinear refractive index modulating, we can obtain the shortest pulse of 590 fs and repetition rate of 20.48 MHz, the peak-to-peak fluctuation of repetition rate is less than 0.4 mHz, and the corresponding standard deviation is 0.1 mHz.

Key words lasers; fiber laser; nonlinear amplifying loop mirror; nonlinear refractive index; repetition rate locking; ultrafast lasers

OCIS codes 140.4050; 140.3615; 190.4370; 060.2630; 320.7090

1 引 言

光纤光学频率梳^[1]有着重要而广泛的应用,如光钟^[2]、时频传递与分配^[3]、天文观测^[4]等。光纤光梳的实现通常需要同时锁定载波包络相位(f_0)和重复频率(f_r)。考虑到 f_0 的探测和锁定较为复杂和困难,且在某些应用场景下,例如双光梳光谱^[5]、双光梳测距^[6]等应用只需锁定重复频率 f_r 即可。

因此,发展具有高可靠性、高稳定性、重复频率锁定的飞秒激光器具有重要意义。

基于全保偏光纤的锁模技术及基于共振增强非线性折射率调制技术的重复频率锁定方法极具优势。目前,基于全保偏光纤的被动锁模技术主要有可饱和吸收镜、非线性偏振旋转、非线性光纤环形镜或非线性放大环形镜等。基于可饱和吸收镜的锁模激光器的优点在于其结构设计简单、波长可控性强、

收稿日期: 2018-02-26; 修回日期: 2018-03-30; 录用日期: 2018-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(11404211)

* E-mail: qianghao@usst.edu.cn(通信作者); ** E-mail: songyang@st.usst.edu.cn

锁模启动成功率高。最近,He 等^[7]使用一种透/反复合双饱和吸收体提高了吸收体对光脉冲前后沿的吸收,可以有效压缩光脉冲宽度。但是,可饱和吸收体的可靠性较差,主要原因在于它通常工作在饱和功率附近,容易产生光致损伤^[8]。非线性偏振旋转锁模类似于快速饱和吸收体,具有无损伤和易于搭建的优点,一直以来都是采用非保偏光纤搭建,但锁模脉冲的长期稳定性较差。最近,基于非线性偏振旋转锁模的光纤激光器实现了全保偏化和全光纤结构,利用多次角度熔接抵消了脉冲在保偏光纤快轴和慢轴的偏振模色散。但是,温度和振动仍会影响光纤的双折射,激光器仅能在控温极好的状态下稳定工作^[9-10]。非线性环形镜^[11-18]是基于非线性干涉原理的叠加脉冲锁模技术工作的,由于这种锁模方式依赖于正、反向传输的脉冲在环路中累积的非线性相移差,因此,传统的非线性环形镜只能工作在较低的重叠频率下(通常小于 10 MHz^[11-13])。1987年,Yariv^[14]在非线性环内加入能提供一定线性相移的非互易性组件,通过波片与法拉第旋光器组合显著降低了锁模对非线性相移的需求。2016年,Jiang 等^[15]设计了光纤耦合的相移器,它能提供 $\pi/2$ 的线性相移,实现了全保偏掺镱光纤激光器的低阈值锁模。在 1 μm 波段内,超短脉冲在光纤中表现为耗散孤子,需要在腔内加入 2.8 nm 带宽的滤波器(或 300 line/mm 的光栅)进行光谱滤波,才可以获得光谱宽度为 3.1 nm(8 nm)的锁模脉冲输出,相应脉冲宽度为 2.13 ps(1.1 ps)。2017年,邹峰等^[16]在非线性放大环形镜内加入了一个可调谐滤波器,在实现全正色散耗散孤子锁模的同时还获得了 1015~1080 nm 的可调谐激光输出,脉冲宽度变化范围为 7.86~17.80 ps。同年,Guo 等^[17]和 Li 等^[18]相继报道了对非线性放大环形镜锁模掺镱光纤激光器载波包络相位的探测和锁定结果。与 1.55 μm 波段光纤激光器不同的是,1 μm 波段光纤激光器腔内的色散补偿尚无法实现全光纤化,通过对块状光栅对的光纤耦合封装能够解决这一问题。

在解决全保偏光纤锁模的基础上,通过对激光器重复频率的精确锁定,可以实现低噪声的锁模脉冲输出。重复频率锁定方法主要有采用压电陶瓷(PZT)控制振荡器的几何腔长或采用控制腔内传输介质折射率这两种方法。2003年,Tai 等^[19]将钛宝石激光器谐振腔的一个光学镜片固定在 PZT 上,锁定后重复频率的抖动量降到了 mHz 量级。2017年,吴浩煜等^[20]将掺铒光纤振荡器中的一段光纤固

定在 PZT 上进行重复频率锁定,锁定后重复频率的标准偏差为 0.65 mHz。然而,PZT 的主要缺点在于需要较高的驱动电压、胶水固定安装、长期稳定性欠佳等,难以实现长时间的高精度重复频率锁定。2015年,Shen 等^[21]在非线性偏振旋转锁模激光器内加入一个电控偏振控制器,通过粗调和精调控制电压实现了锁模自启动和重复频率的锁定,重复频率锁定的标准偏差为 1.4 mHz。2013年,Rieger 等^[22]采用共振增强式非线性折射率调制技术对掺铒激光器的重复频率进行锁定,通过在掺铒激光器内加入一个 980 nm/1550 nm 波分复用器和一段掺镱光纤,调制加载至该掺镱光纤上的抽运光强度来改变该段光纤的反转粒子数,进而控制该段光纤的非线性折射率,实现对激光器有效腔长的控制,重复频率的标准偏差为 22 mHz。2017年,罗浆等^[23]在基于可饱和吸收体锁模的全保偏掺镱光纤激光器(F-P 腔)中加入一段掺铒增益光纤,实现了峰-峰值波动范围小于 0.5 mHz 的重复频率锁定,相应的标准偏差为 0.16 mHz。由于该腔结构较难实现色散补偿,输出脉冲宽度为 20 ps。

本实验在非线性放大环形镜锁模的掺镱光纤激光器中采用共振增强式非线性折射率调制技术,实现了全保偏飞秒脉冲激光器的重复频率锁定。采用非互易性相移器件将脉冲锁模阈值降低至 170 mW。通过优化腔内色散和抽运功率实现了 590 fs 的锁模脉冲输出,平均功率为 0.22 mW,重复频率为 20.48 MHz。通过反馈控制掺铒光纤上的抽运光强度,实现了激光器重复频率的精确锁定,抑制了激光器的低频噪声,锁定精度为 0.1 mHz。

2 实验装置和方法

实验装置图如图 1(a)所示。图 1 中:LD 表示激光二极管;WDM 表示波分复用器;YSF 表示掺镱单模单包层光纤;EDF 表示掺铒光纤;col.表示准直器;DPMFM 表示保偏相位延时法拉第镜;coupler 1,coupler 2 和 coupler 3 分别表示 45:55,5:95 和 5:5分束器;FWG 表示函数波形发生器;counter 表示频率计数器;LP 表示低噪声前置放大器;PD1、PD2 和 PD3 表示光电二极管;driver 表示精密电流源;Rb 表示铷钟。

非线性放大环形镜锁模激光器包括 7.5 m 长的非线性环和 1.2 m 长的线性臂。激光振荡器的所有光纤均为保偏光纤。腔内中央的 coupler 1(45:55分束器)将线性臂中反射回的光分为两束方向相反、

强度相近的光。实验以最大输出功率为 400 mW、中心波长为 974 nm 的半导体激光器 LD1 为抽运源,通过 980 nm/1030 nm 波分复用器 WDM1 将抽运光耦合入谐振腔内。振荡器增益介质为 1 m 长的掺镱光纤。该掺镱光纤在 975 nm 波长处的吸收系数约为 250 dB/m,纤芯模场直径为 7.5 μm ,数值孔径为 0.11。为了使非线性环内正、反方向传输的脉冲易产生相移差,一方面将掺镱光纤不对称放置,另一方面在非线性环内加入一个 1030 nm 波段的非互易性相移器,以降低锁模对非线性相移的需求。相移器由法拉第旋光器和波片组成^[14-15]。沿顺时针传输的光束在进入非线性环的同时被放大,沿逆时针传输的光束则在离开非线性环时才被放大。受到与强度相关的自相位调制和交叉相位调制等非线性效应的作用,正、反向传输的脉冲回到 coupler 1 时获得了不同的非线性相移。脉冲中央较强部分的相移达到 π 时被透射,而脉冲边沿部分的能量较低,获

得的相移较小而被反射。为了实现振荡器直接输出脉冲宽度可达 fs 量级,本实验在线性臂中加入了色散补偿器件。coupler 1 的一个端口连接有 1 支准直器(Col),用于将光纤中传输的光转换为空间光,空间部分由一对透射式光栅以及一个反射镜组成。光栅刻线密度为 1250 line/mm,通过调整两光栅的间距来调整腔内色散。在实验中,采用带宽为 2 GHz 的光电二极管 PD1、PD2 和 PD3 测量激光器的重复频率信号。非线性环内 coupler 2(5:95 分束器)port 3 端输出的光脉冲信号通过光电二极管 PD3 转换为电信号,连接至示波器用于监测激光器锁模状态。port 1 端输出的脉冲经过 coupler 3(5:5 分束器)分为两束:一束由 port 4 端输出,通过 PD2 转换为电信号传输至频率计数器,以测量重复频率的稳定性;另一束由 port 5 端输出至光纤放大器,再通过自相关仪及频率分辨光学开关(FROG)测量脉冲宽度。

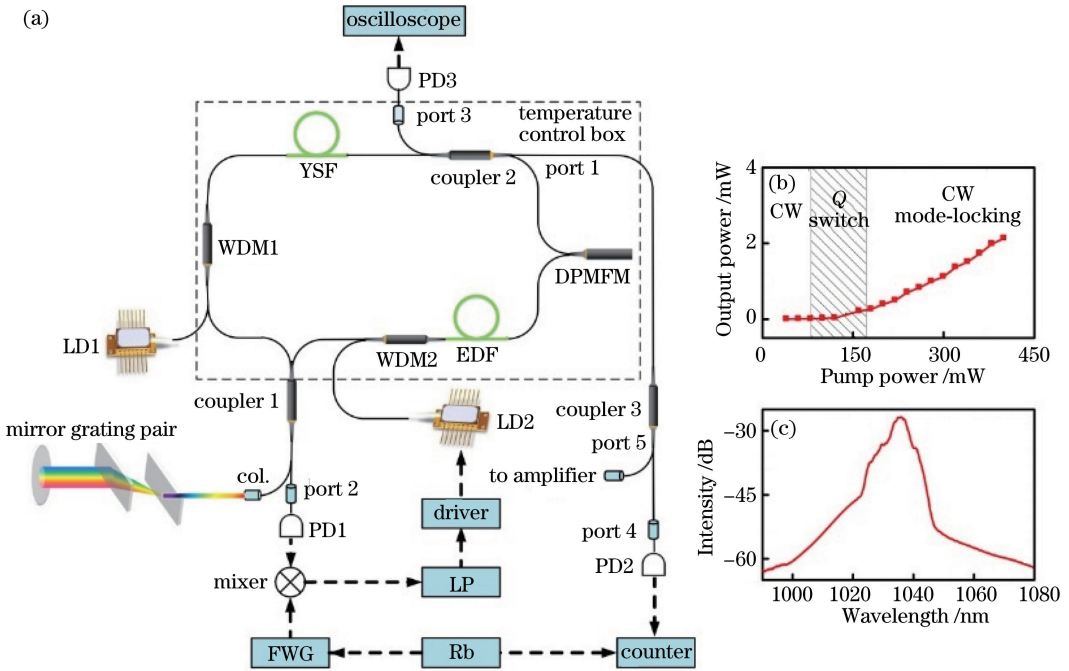


图 1 (a) 实验装置图;(b) port 1 端的输出功率;(c) port 1 端的输出光谱

Fig. 1 (a) Experimental setup; (b) measured output power at port 1; (c) measured spectral profile at port 1

共振增强式非线性折射率调制技术锁定重复频率是通过抽运调制一段 1.5 m 长的掺镱光纤来实现的。该掺镱光纤在 1530 nm 的吸收系数为 55 dB/m,纤芯模场直径为 8.8 μm ,数值孔径为 0.15。实验以最大输出功率为 200 mW、中心波长为 974 nm 的半导体激光器 LD2 为抽运源,通过一个 980 nm/1030 nm 波分复用器 WDM2 将抽运光耦合至该段掺镱光纤上。采用重复频率的高次谐波

可获得更为显著的误差信号,从而得到更高的重复频率锁定精度^[23-24]。本实验是将光电二极管 PD1 测到的重复频率信号在混频器中与信号发生器(Anapico APSIN2010)的参考信号(重复频率信号的 20 次谐波)进行混频,产生实时误差信号;该误差信号通过低噪声前置放大器(放大倍数为 $1 \sim 5 \times 10^4$ 可调,滤波范围 1 Hz~1 MHz 可调)处理后加载至恒流源(ILX Lightwave, LDX-3525B)上,从而调

制 LD2 的输出功率,在不影响锁模状态的情况下,实现对重复频率的闭环锁定。系统中的信号发生器和频率计数器均参考铷钟的频率标准(FS725,SRS Inc,输出频率为 10 MHz,秒稳定度为 2×10^{-11} ,频率准确度为 5×10^{-11})。

3 实验数据和分析

在实验中,首先寻找了激光器稳定锁模的抽运区间。如图 1(b)所示:当 LD1 抽运功率低于 80 mW 时,激光器工作在连续波(CW)输出状态;当 LD1 抽运功率处于 80~170 mW 之间时,振荡器出现了不稳定的调 Q 锁模状态。实验发现,激光器锁模脉冲的最低抽运阈值为 170 mW,脉冲重复频率为 20.48 MHz。相比于文献[17]中的锁模阈值增加了 35 mW,主要是因为腔内加入的一段掺铒光纤增加了吸收和熔接损耗。图 1(c)是当 LD1 的输出功率为 170 mW 时,使用光谱仪(YOKOGAWA ,AQ6370)在 port 1 端测量的输出光谱,光谱半峰全宽(FWHM)为 5.19 nm。

当 LD1 抽运输出功率进一步增加时,激光器输出了多峰结构的脉冲,其主要原因在于环内的非线性相移受到了与强度相关的自相位调制和交叉相位调制等非线性效应的影响^[25-26]。使用自相关仪测量

的激光器输出脉冲宽度会出现由脉冲多峰结构产生的脉宽跳变,无法准确测量出脉冲宽度的变化。故本实验采用 FROG(coherent solutions,HR100)对该锁模振荡器输出脉冲的时域和频域特性进行了分析。考虑到 FROG 对探测脉冲的功率要求,本实验使用了一个总长为 2 m 的掺铒光纤放大器(增益光纤长度为 1 m)将 port 5 端输出脉冲的功率放大至 10 mW。图 2(a)显示了脉冲宽度随 LD1 抽运功率的变化。图 2(b1)~(b3)分别是抽运输出功率为 170,200,310 mW 时测量的光谱和相位曲线。当 LD1 抽运输出功率从 338 mW 减小至 186 mW 时,脉冲宽度从 9.1 ps 减小至 3.0 ps。当抽运功率进一步由 186 mW 降至 184 mW 时,脉冲宽度从 3.0 ps 跳变为 0.63 ps。其主要原因在于激光器的输出脉冲从多峰结构变成单峰结构,从图 2(b2)中的三峰突变成图 2(b3)中的单峰。图 2(d1)~(d3)是相应恢复出的光谱和相位信息,可以看出,随着 LD1 输出抽运功率减小,激光器输出脉冲的光谱宽度逐渐增大。图 2(e1)~(e3)为使用频谱分析仪(Agilent N9000A)在 port 1 端测得的对应频谱,激光器输出脉冲的频谱底部噪声随着抽运功率的减小而降低,但频谱信号的信噪比保持不变,均为 57 dB。

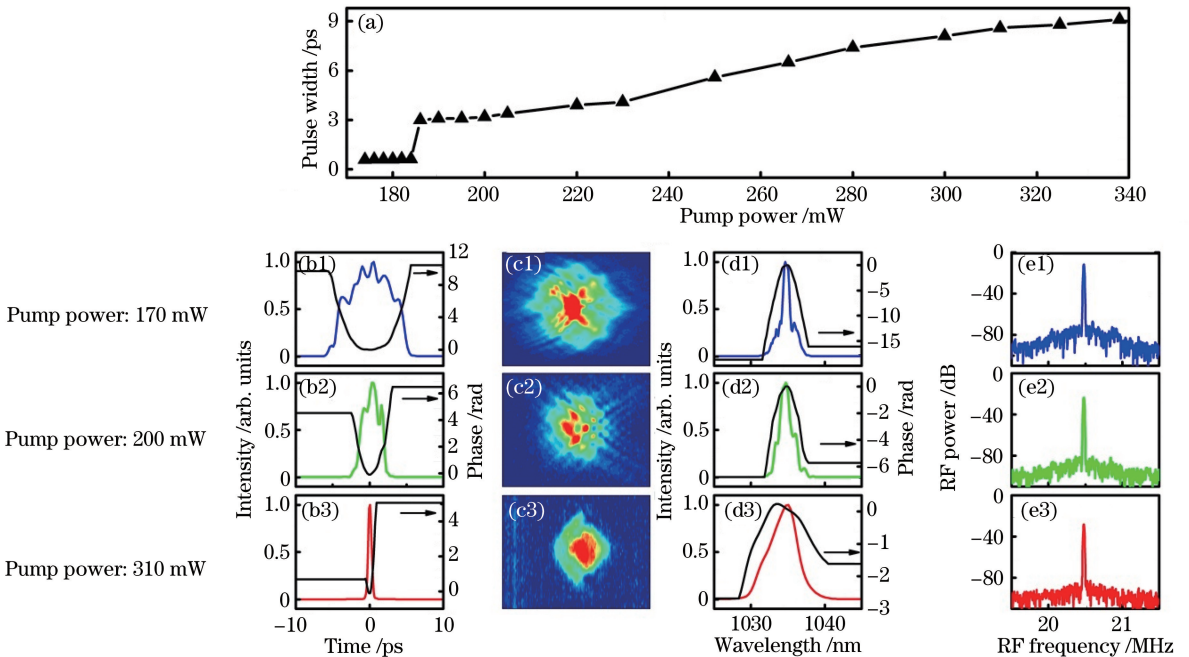


图 2 (a) port 5 端输出脉冲放大后脉冲宽度随 LD1 输出功率的变化;port 5 端输出脉冲放大后,在 LD1 抽运输出功率为 170,200,310 mW 时测量得到的(b)光谱和相位曲线、(c) FROG 曲线和(d)光谱和相位曲线;

(e) port 1 端分别在 LD1 抽运输出功率为 170,200,310 mW 时测量得到的频谱

Fig. 2 (a) Variation of pulse width at port 5 after amplifying with pump power of LD1; measured (b) spectra and phase curves, (c) FROG traces and (d) spectra and phase curves when pump power of LD1 is 170, 200, 310 mW;

(e) measured frequency spectra when pump power of LD1 is 170, 200 and 310 mW at port 1

实验第二步采用共振增强式非线性折射率调制技术实现了该非线性环形镜锁模掺铒光纤激光器的重复频率锁定。为了尽量克服实验室内温度变化对重复频率锁定的影响,本课题组将激光器的光纤部分[范围如图 1(a)中虚线框所示]置于一个恒温箱内。恒温箱温度保持在 22 °C,温控精度为 0.1 °C。LD2 的静态工作点(初始功率)设定为 75 mW。采用 Allan 方差对激光器重复频率锁定前后的采集数据进行分析。如图 3(a)所示:激光器未锁定时,在 2000 s 的测试时间内激光器重复频率峰-峰值的波动范围为 20 Hz,相应的标准偏差为 6 Hz;锁定前的

Allan 方差随着积分时间增加而单调递增,在 1 s 积分时间内的 Allan 方差为 0.17,在 1000 s 积分时间内的 Allan 方差增至 2.05×10^5 。如图 3(b)所示:当激光器重复频率锁定后,重复频率峰-峰值的波动范围小于 0.4 mHz,相应的标准偏差为 104 μ Hz;锁定后的 Allan 方差随着积分时间增加而单调递减,在 1 s 积分时间内的 Allan 方差为 1.14×10^{-8} ,在 1000 s 积分时间内的 Allan 方差降低至 1.83×10^{-12} ,表明反馈控制掺铒光纤的折射率已实现对重复频率的精确锁定。本实验中的重复频率锁定精度为 104 μ Hz,略小于参考文献[23]中的 160 μ Hz。

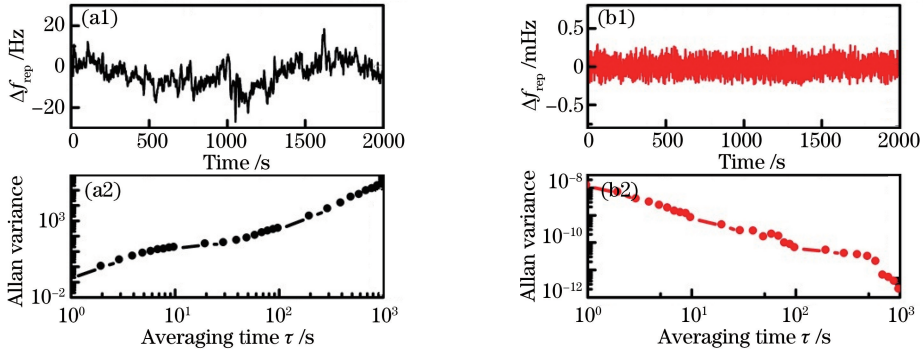


图 3 (a)激光器未锁定时的重复频率抖动曲线和 Allan 方差;(b)激光器锁定时的重复频率抖动曲线和频率 Allan 方差
Fig. 3 (a) Repetition frequency fluctuation curve and Allan variance when laser is unlocked;
(b) repetition frequency fluctuation curve Allan variance when laser is locked

相位噪声是衡量频率稳定性的重要指标之一。本实验利用双通道互相关技术参考信号源方法和外差鉴相器方法测量了激光器锁定前后的单边带(SSB)相位噪声功率密度谱和相位噪声积分^[27]。如图 4(a)所示,图中黑色曲线是激光器重复频率锁定前在 port 5 端测量的单边带相位噪声,红色曲线是激光器重复频率锁定后的单边带相位噪声。锁定前后的相位噪声曲线在频偏小于 30 Hz 区间内明显不

同,表明锁相反馈控制部分的整体带宽小于 100 Hz。结果表明,低频环境噪声通过该反馈控制方法可以得到有效抑制。当频偏超过 30 Hz 后,重复频率锁定前后的噪声没有明显差异,这一区域内的噪声主要由抽运噪声和量子噪声引起^[28]。以频偏 1 Hz 处的噪声为例,未锁定时的噪声为 -39.29 dBc/Hz,锁定后的噪声为 -76.47 dBc/Hz。图 4(b)比较了锁定前后的相位噪声积分,重复频率

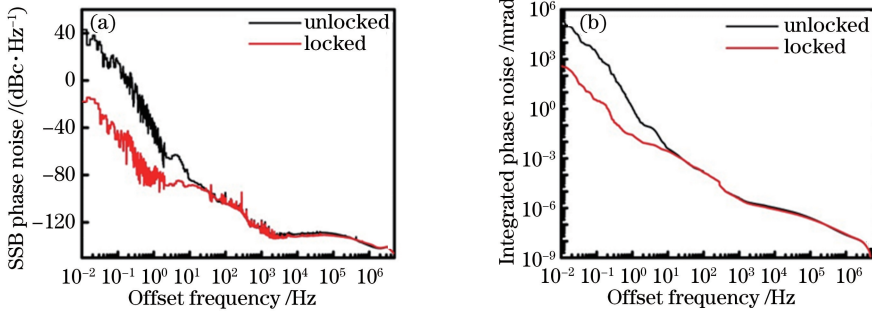


图 4 (a) port 5 端激光器自由漂移时(黑色)和重复频率锁定时(红色)的单边带相位噪声;
(b) port 5 端激光器自由漂移时(黑色)和重复频率锁定时(红色)的相位噪声积分

Fig. 4 (a) SSB phase noise measured at port 5 when the repetition rate of the laser is free-running (black line) or locked (red line); (b) the integrated phase noise measured at port 5 when the repetition rate of the laser is free-running (black line) or locked (red line)

锁定前,积分区间 0.01 Hz~5 MHz 内的相位噪声积分为 2.5×10^5 mrad,锁定后为 379 mrad。下一步工作是采用高频器件(如电光调制器)进行高频噪声的抑制。

4 结 论

采用 NALM 技术搭建了全保偏掺镱光纤激光器。通过在激光器非线性环内加入一个能提供线性相移的非互易性元件,有效减小了锁模脉冲的抽运阈值和腔内光纤长度。获得了 20.48 MHz 重复频率下的脉冲激光输出,最小输出脉宽为 590 fs,输出平均功率为 0.22 mW。结合共振增强式非线性折射率调制技术实现了重复频率的精确锁定,减小了激光器的低频噪声,获得了标准偏差为 104 μ Hz 的锁定精度。在未来的工作中可以进一步锁定激光器的载波包络相位,以实现全光纤结构的光学频率梳。

参 考 文 献

- [1] Nicola C, Marco C, Brandon R, *et al.* The optical frequency comb fiber spectrometer [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12995.
- [2] Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D, *et al.* Making optical atomic clocks more stable with 10-16-level laser stabilization[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(3): 158-161.
- [3] Predehl K, Grosche G, Raupach S M, *et al.* A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place [J]. *Science*, 2012, 336 (6080): 441-443.
- [4] Steinmetz T, Wilken T, Araujo-Hauck C, *et al.* Laser frequency combs for astronomical observations [J]. *Science*, 2008, 321(5894): 1335-1337.
- [5] Holzwarth R, Udem T, Hansch T W, *et al.* Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(11): 2264-2267.
- [6] Yang L, Nie J, Duan L. Dynamic optical sampling by cavity tuning and its application in lidar[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3850-3860.
- [7] He G L, Xu L, Ma X H, *et al.* Passively mode-locked fiber laser based on transmission/reflection composite double saturable absorber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 111405.
何广龙, 徐莉, 马晓辉, 等. 透/反复合双饱和吸收体被动锁模光纤激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111405.
- [8] Saraceno C J, Schriber C, Mangold M, *et al.* SESAMs for high-power oscillators: design guidelines and damage thresholds[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, 18(1): 29-41.
- [9] Szczepanek J, Kardaś T M, Radzewicz C, *et al.* Ultrafast laser mode-locked using nonlinear polarization evolution in polarization maintaining fibers[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 575-578.
- [10] Nielsen C K, Keiding S R. All-fiber mode-locked fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(11): 1474-1476.
- [11] Ma H Q, Liu C, Zhao W, *et al.* Figure-of-eight cavity Yb³⁺-doped fiber mode-locked lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(9): 1173-1177.
马海全, 刘畅, 赵卫, 等. 8 字形腔锁模掺 Yb³⁺ 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2005, 32(9): 1173-1177.
- [12] Avdokhin A, Popov S, Taylor J. Totally fiber integrated, figure-of-eight, femtosecond source at 1065 nm [J]. *Optics Express*, 2003, 11(3): 265-269.
- [13] Aguegaray C, Broderick N G, Erkintalo M, *et al.* Mode-locked femtosecond all-normal all-PM Yb-doped fiber laser using a nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10545-10551.
- [14] Yariv A. Operator algebra for propagation problems involving phase conjugation and nonreciprocal elements[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(21): 4538-4540.
- [15] Jiang T, Cui Y, Lu P, *et al.* All PM fiber laser mode locked with a compact phase biased amplifier loop mirror[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(16): 1786-1789.
- [16] Zou F, Yang X Z, Pan W W, *et al.* 1015-1080 nm tunable polarization-maintaining dissipative soliton mode-locked fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0901005.
邹峰, 杨学宗, 潘伟巍, 等. 1015~1080 nm 可调谐保偏光纤耗散孤子锁模激光器[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0901005.
- [17] Guo Z, Hao Q, Yang S, *et al.* Octave-spanning supercontinuum generation from an NALM mode-locked Yb-fiber laser system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 1-7.
- [18] Li Y, Kuse N, Rolland A, *et al.* Low noise, self-referenced all polarization maintaining Ytterbium fiber laser frequency comb [J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 18017-18023.
- [19] Tai H Y, Park S T, Kim E B, *et al.* Orthogonal control of femtosecond mode-locked laser having zero carrier-offset frequency with three-axis PZT [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, 9(4): 1025-1029.
- [20] Wu H Y, Shi L, Ma T, *et al.* Design and development technique for optical frequency comb

- based on femtosecond fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0601008.
- 吴浩煜, 时雷, 马挺, 等. 基于飞秒光纤激光器的光频率梳设计与研制技术[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0601008.
- [21] Shen X, He B, Zhao J, *et al.* Repetition rate stabilization of an erbium-doped all-fiber laser via opto-mechanical control of the intracavity group velocity[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(3): 1511-1513.
- [22] Rieger S, Hellwig T, Walbaum T, *et al.* Optical repetition rate stabilization of a mode-locked all-fiber laser[J]. Optics Express, 2013, 21(4): 4889-4895.
- [23] Luo J, Yang S, Hao Q, *et al.* Precise locking the repetition rate of a SESAM mode-locking all polarization maintaining fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206003.
- 罗浆, 杨松, 郝强, 等. SESAM 锁模全保偏光纤激光器重复频率的精确锁定[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206003.
- [24] Hao Q, Zhang Q, Chen F, *et al.* All-optical 20- μ Hz-level repetition rate stabilization of mode locking with a nonlinear amplifying loop mirror [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(11): 2833-2837.
- [25] Bollond P G, Barry L P, Dudley J M, *et al.* Characterization of nonlinear switching in a figure-of-eight fiber laser using frequency-resolved optical gating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(3): 343-345.
- [26] Kibler B, Fischer R, Lacourt P A, *et al.* Optimised one-step compression of femtosecond fibre laser soliton pulses around 1550 nm to below 30 fs in highly nonlinear fiber[J]. Electronics Letters, 2007, 43(17): 915-916.
- [27] Scott R P, Langrock C, Kolner B H. High-dynamic-range laser amplitude and phase noise measurement techniques [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 7(4): 641-655.
- [28] Newbury N R, Swann W C. Low-noise fiber-laser frequency combs (invited) [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(8): 1756-1770.